

УДК 681.5.015

**І.С. Кушнір, А.І. Андрєєв, О.М. Харабет**Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, м. Одеса,  
кафедра автоматизації та управління технологічними процесамиE-mail: [rottgarson@mail.ru](mailto:rottgarson@mail.ru), [aia2003@ukr.net](mailto:aia2003@ukr.net)Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса,  
кафедра автоматизації теплоенергетичних процесівE-mail: [kharabet@yandex.ru](mailto:kharabet@yandex.ru)

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ З ВИРОБНИЦТВА ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

### Анотація

*Кушнір І.С., Андрєєв А.І., Харабет О.М. Математична модель установки з виробництва водовугільного палива. В роботі виконано розробку математичної моделі установки з виробництва водовугільного палива (ВВП) за каналом оцінки в'язкості та надано її обґрунтування. Отримано еквівалентні передатні функції за відповідними каналами. Розглянуті можливості використання запропонованої моделі в створенні комплексної автоматичної системи управління виробництвом ВВП.*

**Ключові слова:** технологічний процес, математична модель, передатна функція, водовугільне паливо, в'язкість, витрата.

### Загальна постановка задачі та її актуальність

Стратегія розвитку енергетики України передбачає не лише комплексне технічне переоснащення та підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, але також і скорочення обсягів споживання імпортованих енергоресурсів, тобто природного газу та нафтопродуктів. Відповідно до Енергетичної стратегії України зростатимуть обсяги використання вугілля, яким країна забезпечена у повному обсязі [1].

Вугільна промисловість може покрити зростаючу потребу в паливі не лише енергетики, а й таких споживачів як чорна металургія, хімічна промисловість, комунально-побутовий сектор й ін. Вугілля як паливо характеризується рядом очевидних переваг: величезні запаси, простота зберігання, транспортування й використання в побуті, можливість вирішити проблеми підвищення ефективності й екологічності на більшості теплових електростанцій [2]. Ці переваги дозволять йому зберегти своє положення, щонайменше, до 2030-2050 р.

Спалювання вугілля з використанням звичних технологій представляє собою нерациональний процес з низьким коефіцієнтом корисної дії та великою шкодою для довкілля. Потрібні нові технології, що дозволять використовувати достоїнства вугілля, але звести до мінімуму шкідливі викиди в атмосферу та складнощі в процесі його спалення [2, 6, 10].

Принципово важливим рішенням для вугільної енергетики може стати виготовлення з вугілля різної якості, у тому числі і з відходів вуглезбагачення, водовугільного палива. Виробництво та споживання відносно нового та безпечного виду палива дозволить відродити вугільну промисловість країни, дасть змогу звільнитись від втрати коштів на імпорт дорогих природного газу та нафтопродуктів, а також підштовхне до розвитку паливно-енергетичну індустрію держави, що перебуває в занедбаному стані та потребує цілковитого оновлення.

Актуальність даного напрямку досліджень наглядно демонструють такі провідні індустріальні країни як Сполучені Штати Америки [11, 12], Італія, Китай [13] та Росія.

В 80-х роках минулого століття дана технологія була реалізована на промислово-дослідницькому комплексі «Белово – Новосибирская ТЭЦ-5», а в наш час практичне застосування та експериментальні дослідження ведуться науково-дослідницьким інститутом «Новосибирсктеплоэлектропроект» ВАТ «Сибирский ЭНТЦ» (Росія), ФГУП «НПЦ “Экотехника” (Росія), ТОВ «Амальтеа-Сервис» (Росія), ВАТ «Корпорация «Компомаш» (Росія) та ін. В Україні у 2008 р. на базі шахти "Довжанская-Капитальная" було випробувано пілотний проект по приготуванню ВВП за оцінками якого впровадження нової технології допоможе підприємству щорічно заощадити значні кошти [2], також виробництво ВВП налагоджене на ВАТ «Угольная компания «Шахта «Красноармейская-Западная №1».

Варто звернути увагу на результати ряду робіт в яких показано, що використання даної технології дозволяє підвищити ефективність спалення вугілля на 18-26% та знизити в 1,5-3,5 разів кількість шкідливих викидів в атмосферу [7-10]. Головним достоїнством цього палива є його дешевизна і екологічність. Вартість готового ВВП дешевше за мазут в 2-4 рази і не перевищує більше, ніж на 15-20% ціни початкового вугілля на місці його видобування. До того ж ВВП є вибухо- і пожежобезпечне. Технології його зберігання і транспортування прості і можуть бути повністю автоматизовані, перекачування можна здійснювати по трубопроводах аналогічно нафті. На відміну від мазутних цистерн, місткості, в яких взимку транспортується ВВП, легко очищаються від залишків палива.

Переведення котельних на ВВП зазвичай займає не більше 7 міс., а при серійному виготовленні необхідного для цього устаткування термін скоротиться удвічі. Економія на виробленні теплової і електричної енергії допоможе окупити витрати на реконструкцію котельної середньої потужності за 2,5-3 роки [7].

Постає питання не лише щодо вибору найбільш ефективного способу виробництва та використання ВВП, а й пошуку нових методів управління та розробки систем автоматичних контролю усього циклу існування ВВП.

#### **Постановка задачі дослідження**

В публікаціях, що присвячені визначенню в'язкості водовугільних суспензій, основну увагу приділяють способам оцінки в'язкості кінцевого продукту для розрахунку гідравлічних втрат при транспортуванні та потужності засобів розпилу в теплогенеруючих або інших енергетичних установках [3, 4], але узагалі відсутня будь-яка інформація про математичну модель установки виробництва водовугільного палива. Ця модель надасть можливість теоретичних досліджень усього процесу та дозволить створити ефективну комплексну автоматичну систему управління.

Таку математичну модель можна створити базуючись на експериментальних даних, але експеримент майже завжди є занадто енергоємним, займає багато часу та потребує багато ресурсів, особливо якщо його необхідно провести неодноразово.

В роботі запропоновано вирішити задачу розробки та створення адекватної моделі, опираючись на практичні результати попередніх експериментальних досліджень [7-12] та описання фізико-хімічних реакцій в процесі виробництва ВВП [3, 4, 6].

#### **Вирішення задачі та результати дослідження.**

Для створення адекватної моделі установки з виробництва ВВП в першу чергу варто виділити основні вхідні потоки та вихідні змінні, що повинні відповідати заданим значенням, а також усі збурення, що в значній мірі можуть вплинути на якісні показники ВВП як рідкого палива. Надалі варто розглянути всі агрегати та обладнання, що входять до складу технологічної лінії з виробництва ВВП за відповідними вхідними та вихідними потоками й збуреннями, що дасть змогу визначити деякі узагальнені передатні функції каналів та, якщо це можливо, відповідні коефіцієнти даних функцій.

Структура технологічного процесу виробництва ВВП показана на рис. 1 [5]. При даному способі виробництва використовують вже попередньо подрібнене вугілля. Розглянутий в [5] спосіб виробництва дає можливість покращити фізико-хімічні показники

ВВП завдяки додаванню на лише реагента-пластифікатора, а також мастильного агенту й органічного компоненту, що також сприятимуть підвищенню якості створеного палива. Якщо ж використовувати звичайний спосіб виробництва [6], то можна в наведеній схемі виключити ділянку мастильної агломерації з подачею мастильного агенту та додавання органічного компоненту на ділянці диспергування.

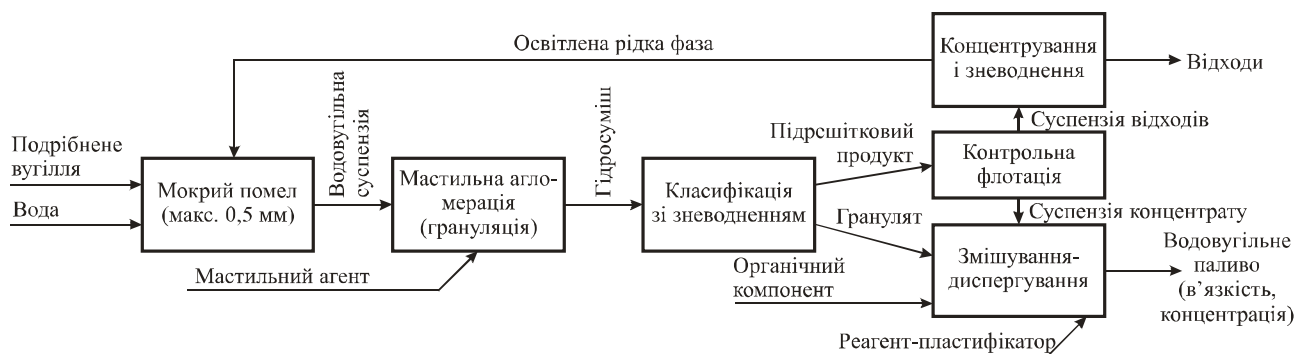


Рисунок 1 – Принципова схема установки з виробництва водовугільного палива

Одним з важливих параметрів ВВП, що дає можливість оцінки його якісних характеристик як рідкого палива, є в'язкість суспензії [4]. Значення в'язкості істотно залежить від співвідношення основних компонентів суміші, але її виділяють як окремий параметр тому, що саме в'язкість визначає якість розпилу суспензії в топці. Від в'язкості також залежить навантаження на насосне устаткування, яке використовується при транспортуванні ВВП.

Слід зазначити, що в'язкість значною мірою залежить від гранулометричного складу вугілля. Ця залежність отримана експериментальним шляхом і є нелінійною [11], а тому для спрощення математичної моделі установки не буде врахована. Вважатимемо, що на виході ділянки класифікації суміш містить лише частки вугілля, які за своїм гранулометричним складом відповідають заданому технологією значенню.

Станом на теперішній час, процес виробництва ВВП передбачає лише визначення в'язкості кінцевого продукту, що нашоєхує на необхідність розробки адекватної моделі технологічного процесу виробництва ВВП за каналом оцінки в'язкості, яка дозволить створити оптимальну систему автоматичного управління в'язкістю суміші.

Детально розглянувши зображену на рис. 1 схему, можна зробити висновки, що на в'язкість ВВП впливають гранулометричний склад, кількість твердої складової в кінцевому продукті, витрата реагента-пластифікатора, а також витрата мастильного агенту й органічного компоненту. Беручи до уваги спосіб виробництва ВВП лише з додаванням реагента-пластифікатора [6], впливом витрат мастильного агенту й органічного компоненту на даному етапі створення математичної моделі нехтуємо.

Отже, безпосередньо на в'язкість разом з властивостями сировини та кількісним відношенням компонентів суміші впливає функціонування наступних вузлів технологічного процесу виробництва ВВП: ділянка мокрого помелу, ділянка класифікації та ділянка змішування-диспергування. Розглянемо детально кожен з них.

На рис. 2 показана модель технологічного процесу виробництва ВВП за каналом оцінки в'язкості, де 1 - ділянка мокрого помелу вугілля з використанням гідродарних технологій, 2 - ділянка класифікації, 3 - ділянка повернення часток з розміром більшим, ніж допустимий, 4 - ділянка змішування-диспергування,  $X_1$  - витрата вугілля (може розглядатись також і швидкість помелу, що характеризує кількість вугільних часток бажаного розміру),  $X_2$  - витрата води,  $X_3$  - витрата реагента-пластифікатора,  $N_1$  та  $N_2$  - збурення у загальному

вигляді, що представляють собою неконтрольовану зміну будь-якої з вхідних величин або коливання властивостей початкового вугілля чи властивостей води, що подається до ділянки мокрого помелу,  $Y$  - значення в'язкості.

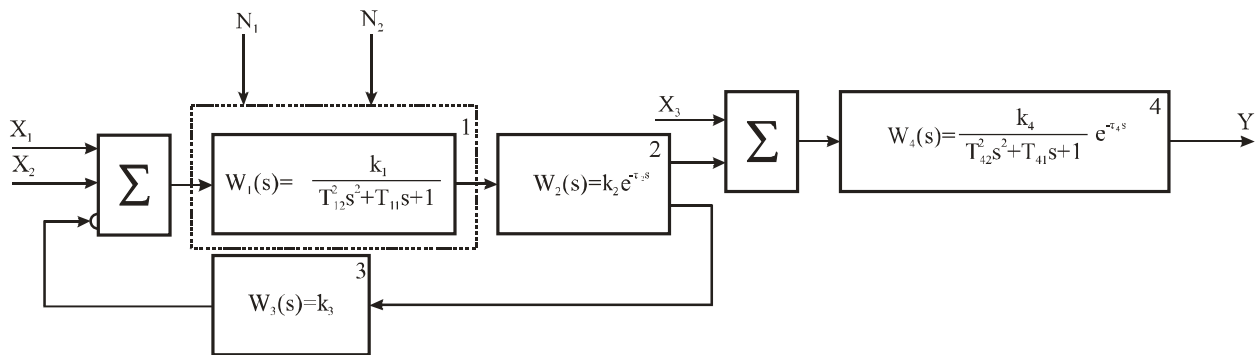


Рисунок 2 – Модель технологічного процесу виробництва ВВП за каналом оцінки в'язкості

Мокрий помел реалізує гідроударна установка мокрого помелу [5], до складу якої входять лінія подавання вугілля, водяний насос, а також система помелу. Безпосередньо на якість помелу впливає початковий розмір часток вугілля та швидкість помелу. При моделюванні такий об'єкт, можна представити за каналом оцінки в'язкості інерційною ланкою другого порядку з передатною функцією:

$$W_1(s) = \frac{k_1}{T_{12}^2 s^2 + T_{11} s + 1}; \tag{1}$$

де  $k_1$  - коефіцієнт передавання ділянки мокрого помелу, залежить від розміру гранул вугілля після мокрого помелу;

$T_{12}$  та  $T_{11}$  - постійні часу ділянки мокрого помелу, залежать від показників якості та початкового розміру гранул вугілля.

Ділянка класифікації при спрощеному дослідженні представляє собою систему сит, що слугують для відсіювання часток розміром більших за допустимі, гранично допустимих часток та зневоднення (лише в наведеному способі виробництва) суспензії для отримання грануляту [5]. Таким чином таку ділянку технологічного процесу можна описати ланкою чистого запізнення  $\tau_2$  з певним коефіцієнтом передачі  $k_2$  за каналом оцінки в'язкості, що залежать від об'єму суспензії перед класифікацією, співвідношення вода-тверда складова та гранулометричного складу суспензії:

$$W_2(s) = k_2 e^{-\tau_2 s}. \tag{2}$$

Лінія повернення часток вугілля більшого розміру, ніж допустимий, представляє собою ланку, яку можна описати передатною функцією пропорційної ланки. Слід зазначити, що в процесі моделювання даної ділянки запізненням можна знехтувати.

$$W_3(s) = k_3. \tag{3}$$

Ділянка змішування-диспергування забезпечує остаточне змішування кінцевого продукту з реагентом-пластифікатором для надання суміші остаточних реологічних

властивостей і може бути описана, як і ділянка мокрого помелу, інерційним об'єктом другого порядку як за витратою суспензії (суміші вугілля та води) так і за витратою реагента-пластифікатора [6]:

$$W_4(s) = \frac{k_4}{T_{42}^2 s^2 + T_{41} s + 1} e^{-\tau_4 s}; \quad (4)$$

де  $k_4$  - коефіцієнт передавання,  $T_{42}$ ,  $T_{41}$  - постійні часу та  $\tau_4$  - чисте запізнення ділянки змішування-диспергування, що залежать від співвідношення вода-тверда складова на кінцевому етапі та гранулометричного складу суспензії.

При докладному розгляді даної ділянки варто зауважити, що до зростання в'язкості веде збільшення часу диспергування та кількості реагента-пластифікатора, що слугує хімічним реагентом підсилення зв'язку між гранулами вугілля та молекулами води [4, 6].

Зазначимо, що технологічний процес виробництва ВВП є системою де збуреннями можуть виступати лише зміна властивостей початкового вугілля та зміна властивостей води, що подається до ділянки мокрого помелу.

Як видно з рис. 2 усі ділянки процесу виробництва ВВП за каналом оцінки в'язкості з'єднані послідовно або зустрічно-паралельно, а тому еквівалентні передатні функції (5) – (7) отримаємо шляхом відповідних перетворень [14] передатних функцій (1) – (4).

Так для каналу «витрата палива-в'язкість» передатна функція матиме вигляд:

$$W_{IB}(s) = \frac{Y}{X_1} = \frac{W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_4(s)}{1 + W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s)},$$

або після відповідних математичних перетворень [7]

$$W_{IB}(s) = \frac{a_{10}}{b_{12} s^2 + b_{11} s + b_{10} e^{-c_{11} s} + 1} e^{-c_{10} s}, \quad (5)$$

де  $a_{10} = k_1 k_2 k_4$ ;  $b_{10} = k_1 k_2 k_3$ ;  $b_{11} = T_{41}$ ;  $b_{12} = T_{42}^2$ ;  $c_{10} = \tau_2 + \tau_4$ ;  $c_{11} = \tau_2$ .

Для каналу «витрата води-в'язкість» передатна функція матиме вид ідентичний передатній функції каналу «витрата палива-в'язкість»:

$$W_{BB}(s) = \frac{Y}{X_2} = \frac{W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_4(s)}{1 + W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s)},$$

або після відповідних математичних перетворень [7]

$$W_{BB}(s) = \frac{a_{20}}{b_{22} s^2 + b_{21} s + b_{20} e^{-c_{21} s} + 1} e^{-c_{20} s}, \quad (6)$$

де  $a_{20} = k_1 k_2 k_4$ ;  $b_{20} = k_1 k_2 k_3$ ;  $b_{21} = T_{41}$ ;  $b_{22} = T_{42}^2$ ;  $c_{20} = \tau_2 + \tau_4$ ;  $c_{21} = \tau_2$ .

Для каналу «витрата реагента-пластифікатора-в'язкість» передатна функція матиме вид:

$$W_{PB}(s) = \frac{Y}{X_3} = W_4(s),$$

або

$$W_{PB}(s) = \frac{a_{30}}{b_{31}s^2 + b_{30}s + 1} e^{-c_{30}s}, \quad (7)$$

де  $a_{30} = k_4$ ;  $c_{30} = \tau_4$ ;  $b_{31} = T_{42}^2$ ;  $b_{30} = T_{41}$ .

Оцінка в'язкості в процесі виробництва ВВП повинна проходити постійно та на основі отриманих даних варто будувати автоматичну систему контролю в'язкості ВВП, що увійде до складу комплексної автоматичної системи керування технологічним процесом у цілому. Багато чинників, що впливають на показники якості ВВП, а в даному випадку на в'язкість неможливо чітко сформулювати, визначити, оцінити та описати узагалі, як і узагальнити коефіцієнти еквівалентної передатної функції для описання технологічних величин та станів ділянок технологічного процесу виробництва ВВП. Це дозволить також використати потужний апарат теорії нечітких множин використати для створення комплексної системи управління процесу виробництва ВВП.

#### **Висновки.**

Визначено передатні функції каналів «витрата палива-в'язкість», «витрата води-в'язкість» та «витрата реагента-пластифікатора-в'язкість» системи, а також наведено спрощену математичну модель установки з виробництва водовугільного палива за каналом оцінки в'язкості.

Запропоновану математичну модель установки з виробництва ВВП за каналом оцінки в'язкості варто використати для моделювання динаміки зміни значення в'язкості суміші та порівняти отримані результати з експериментальними даними.

Створена математична модель установки з виробництва ВВП за каналом оцінки в'язкості є спрощеною і узагальненою та її коефіцієнти потребують постійного уточнення й коректування в процесі подальших досліджень.

#### **Література**

1. Кулик М. М. Загальні проблеми та довгострокові перспективи розвитку енергетики України / М. М. Кулик, Б. С. Стогній // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». - 2006. – Ч. 1. – С. 8 – 15.
2. Фомина О. Жидкий уголь (Перспективы применения водоугольного топлива в Украине и мире) [Електронний ресурс] / О. Фомина // Журнал «Топливо-энергетический комплекс» – 2008. – № 3. Режим доступу: [http://www.tek.ua/article0\\$!1\\$pa!542\\$a!590091.htm](http://www.tek.ua/article0$!1$pa!542$a!590091.htm).
3. Коваленко А. А. Расчет вязкости водоугольного топлива [Електронний ресурс] / А. А. Коваленко, Л. И. Рисухин, А. М. Шворникова, Е. С. Гусенцова // Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vsunud/2009-3E/09kaavvt.htm>.
4. Сорока С. И. Реология жидкости / С. И. Сорока. – Луганск: Издательство ВНУ им. В. Даля, 2001. – 48 с.
5. Способ получения композиционного водоугольного топлива: пат. 2268259 РФ: МПК С10L1/32 (2006.01) / Дзюба Д. А., Заостровский А. Н., Клейн М. С., Мурко В. И., Панина Т. А., Федяев В. И.; заявитель и патентообладатель ЗАО НПП «Сибэкотехника». - № 2004125188/04; заявл. 17.08.2004; опубл. 20.01.2006, Бюл. №02. – 10 с.
6. Производство и использование водоугольного топлива / [Зайденварг В. Е., Трубецкой К. Н., Мурко В. И., Нехороший И. Х.]. – М., Изд-во Академии горных наук. 2001. – 173 с.
7. Преимущества использования ВУТ на примере малых котельных г.Бийска [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://tekpromsnab.ru/production/vut/explanation-VUT.html>.

8. Овчинников Ю. В. Искусственное композиционное жидкое топливо из угля и эффективность его использования [Электронный ресурс] / Ю. В. Овчинников, С. В. Луценко // Доклад на научно-практической конференции «Перспективные энергосберегающие технологии и способы сжигания твердого топлива в котлах малой и средней мощности» 15-18 ноября 2005, г. Кемерово.

9. Водоугольное топливо. Анализ результатов исследования характеристик ВУТ, полученного на ОПУ ООО «Енисейский ЦБК» ОАО Новосибирсктеплоэнергопроект» (на правах рукописи), Новосибирск, 2004, – 26 с.

10. Результаты хроматографического анализа газовых выбросов при сжигании образцов водоугольного топлива на содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), полученные на ЗАО НПП «Сибэкотехника» (на правах рукописи), Кемерово, 2005.

11. Handbook of alternative fuel technologies / [Lee Sunggyu, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka]. – New York: CRC Press, 2007. – 524 p.

12. Anderson Chris M. Subtask 3.16 – Low-Cost Coal-Water Fuel for Entrained-Flow Gasification / Chris M. Anderson. – Morgantown, West Virginia: U.S. Department of Energy, 1997 – 17 p.

13. Wiang Haeng Coal-Water Fuel Preparation and Gasification / [Chris M. Anderson, Mark A. Musich, Brian C. Young, John J. Richter, Ray A. DeWall, Robert O. Ness, Jr.]. – Grand Forks, North Dakota: Energy and Environmental Research Center University of North Dakota, 1996. – 135 p.

14. Зайцев Г. Ф. Теорія автоматичного управління / Г. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов, О. І. Бріцький. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.

Надійшла до редакції:  
01.03.2011

Рекомендовано до друку:  
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

### **Abstract**

**Kushnir I.S., Andreev A.I., Kharabet A.N. Mathematical model of installation on manufacture of water coal fuel.** In article mathematical model of technological process of manufacture of water coal fuel (WCF) on the channel of an estimation of viscosity is executed and its substantiation is presented. Equivalent transfer function of the given process on corresponding channels is received. Possibilities of application of the offered model in creation of automatic control systems are considered.

**Keywords:** technological process, mathematical model, transfer function, water-coal fuel, viscosity, expense.

### **Аннотация**

**Кушнір І.С., Андреев А.И., Харабет А.Н. Математическая модель установки по производству водоугольного топлива.** В работе выполнена разработка математической модели установки по производству водоугольного топлива (ВУТ) по каналу оценки вязкости и представлено ее обоснование. Получено эквивалентные передаточные функции по соответствующим каналам. Рассмотрены возможности применения предложенной модели в разработке комплексной автоматической системы управления производством ВУТ.

**Ключевые слова:** технологический процесс, математическая модель, передаточная функция, водоугольное топливо, вязкость, расход.

© Кушнір І.С., Андреев А.И., Харабет О.М., 2011